

С. В. СТРУТИНСЬКИЙ

## РОБОЧІ ПРОЦЕСИ ІННОВАЦІЙНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ТА АЕРОСТАТИЧНИХ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ ІЗ СТРУМЕНЕВИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ПОЛОЖЕННЯ СФЕРИ

Розглянуто робочі процеси пов'язані з течією рідини в проточних частинах інноваційних гідростатичних та аеростатичних сферичних шарнірів із струменевим регулюванням положення сфери. Обґрунтовано принципи і схемну реалізацію струменевого регулювання. Проведено розрахунки на ЕОМ поля течії в щілині та в системі керуючих струменів. Розроблено спеціальну методику аналітичного розрахунку параметрів течії в щілині шарніра на основі методу ламінарної аналогії. Сформульовані пропозиції по застосуванню раціональних методів технології машинобудування та прогресивних матеріалів у розроблених інноваційних конструкціях шарнірів.

**Ключові слова:** шарнір, сфера, щілина, струмінь, течія, розрахунок, дослідні зразки.

**Вступ.** Просторові системи приводів включають комплекти приводів з'єднані шарнірами. Традиційно застосовуються карданні шарніри на опорах кочення. Вони мають низьку демпфуючу здатність та недостатню довговічність. Альтернативним варіантом є застосування безконтактних сферичних шарнірів – гідростатичних або аеростатичних. При цьому суттєво підвищується точність і довговічність шарнірів. Таким чином розробка сферичних шарнірів рідинного тертя є актуальною задачею.

Проблема в загальному вигляді полягає у розробці ефективних гідростатичних або аеростатичних шарнірів для просторових систем приводів.

В останніх дослідженнях і публікаціях [1, 2] наведені схемні рішення сферичних шарнірів рідинного тертя. Запропоновані методи розрахунку течії в сферичному гідростатичному шарнірі з одним несучим карманом [3]. В окремих публікаціях досліджені робочі процеси в підшипниках [4]. Ряд робіт присвячені реалізації схемних рішень та технологічним проблемам виготовлення гідростатичних та аеростатичних опор [5]. В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що питання розширення функціональних можливостей гідростатичних та аеростатичних сферичних шарнірів у напрямку їх регулювання розроблені недостатньо. Тому до невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка сферичних шарнірів із регулюванням положення сфери.

Метою досліджень викладених в даній статті поставлено встановлення особливостей робочих процесів та характеристик гідростатичних та аеростатичних сферичних шарнірів із запропонованим інноваційним способом струменевого регулювання положення сфери.

Задачами досліджень є розробка методів струменевого регулювання положення сфери і обґрунтування схемних і конструктивних рішень шарнірів, теоретичні та експериментальні дослідження поля течії в щілинах шарнірів, розробка дослідних зразків шарнірів та їх дослідна апробація.

**Виклад основного матеріалу досліджень. Принципи і схемна реалізація струменевого регулювання положення сфери гідростатичного або аеростатичного шарніра.** Сферичні шарніри

рідинного тертя гідростатичні або аеростатичні мають високу точність, в них відсутні сили сухого тертя. Наявність шару рідини або газу між сферою і корпусом забезпечує ефективне демпфування коливань, знижує шум і вібрації системи приводів. На основі проведених досліджень запропоновано суттєве розширення функціональних можливостей шарнірів, яке полягає у регулюванні положення сфери за допомогою струменевої системи керування.

Запропонований принцип струменевого регулювання оснований на регулюванні тиску по периферії щілини [6, 7].

Для реалізації принципів струменевого регулювання розроблені інноваційні конструкції гідростатичних та аеростатичних опорних елементів регульованих сферичних шарнірів [8]. Запропоновані варіанти опорних елементів із пружними вставками та з різними типами дроселів. Опорний елемент із турбулентним дроселем має пружну діафрагму 1 діаметром  $d$ , яка деформується під дією перепаду тиску (рис. 1).

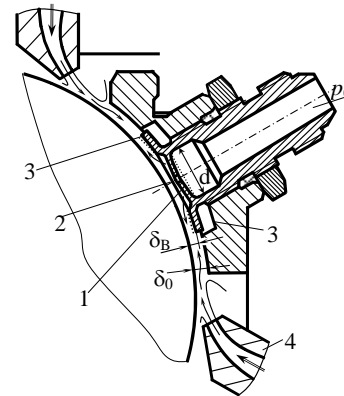


Рис. 1 – Конструктивні схеми гідростатичних або аеростатичних опорних елементів із турбулентним дроселем

Опорний елемент компенсує зміни тиску живлення  $p_0$  підвищуючи стабільність регульованих характеристик опори. При підвищенні тиску живлення  $p_0$  відбувається збільшення перепаду тиску на турбулентному дроселі, який виконано у вигляді отвору 2. При збільшенні перепаду тиску центральна частина діафрагми 1 прогинається в напрямку до сфери, а периферійна частина 3 діафрагми

прогинається у протилежному напрямку. Відповідно збільшується ефективна ширина щілини  $\delta_B$  опорного елемента, що знижує тиск в щілині. Таким чином система компенсує підвищення тиску живлення стабілізуючи характеристики опорного елемента. Струменеве регулювання опорної реакції здійснюється струменями рідини або газу, які витікають із сопл 4.

Розроблений принцип струменевого регулювання реалізовано в реальних конструкціях регульованих сферичних шарнірів. Гідростатичний або аеростатичний сферичний шарнір має точну сферу 1 навколо якої в корпусі розміщені гідростатичні або аеростатичні опорні елементи 2, 3 (рис. 2, а).

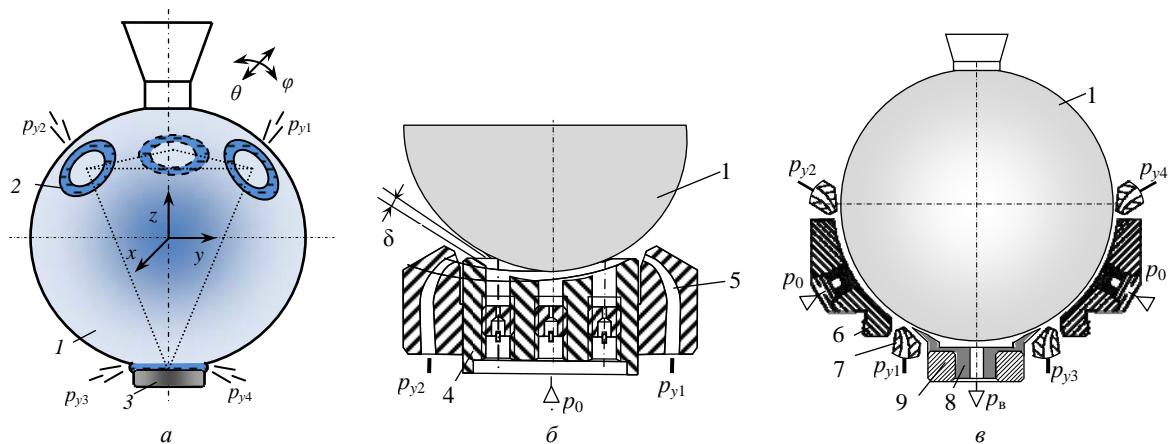


Рис. 2 – Схемні рішення сферичних шарнірів із струменевим регулюванням положення сфери: а – схема розташування чотирьох опорних елементів по периферії сфери; б – конструктивна реалізація опорного елемента; в – схемне рішення широкодіапазонного вакуумно-аеростатичного сферичного шарніра

Навколо під'ятника розміщені сопла 5 системи керування. Наявність п'яти карманів забезпечує ефективно сприйняття просторового навантаження. Тому можлива розробка регульованого сферичного шарніра, який має сферу і лише два опорні елементи даного типу.

Розроблені прогресивні широкодіапазонні регульовані вакуумно-аеростатичні сферичні шарніри із поперечно-кутовими зміщеннями сфери в межах конуса з кутом при вершині  $180^\circ$  і вище. Вакуумно-аеростатичний шарнір (рис. 2, в) має сферу 1, три аеростатичні опорні елементи 6, із соплами 7 струменевого регулювання та вакуумний пристрій 8, який забезпечує реалізацію притискаючого зусилля на сферу. Вакуум в кармані  $p_B$  створюється ежектором. Для забезпечення додаткового зусилля на сферу застосовано потужний постійний магніт 9. При цьому сфера виконана із феромагнітного матеріалу.

Для підвищення ефективності струменевого керування запропоновано інноваційне схемне рішення [9] регульованого сферичного шарніра в якому соплові пристрої виконані безпосередньо в корпусі опорного елемента (рис. 3).

В корпусі 1 опорного елемента виконано канал підводу робочого середовища під тиском  $p_0$  (рис. 3, а). В каналі наявний дросель у вигляді отвору 2 через який середовище подається в центральний карман 3. Безпосередньо на сферичній поверхні опорного елемента виконані дросельні

Опорні елементи із струменевим регулюванням ззору розташовані рівномірно по поверхні сфери. Зміна тиску в соплах керування  $p_{y1}, \dots, p_{y4}$  забезпечує регулювання положення сфери в просторі в напрямках  $x, y$  і  $z$  в межах діапазону 0,01–0,1 мм.

Кожен опорний елемент має окрему систему струменевого регулювання, яка пов'язана з особливістю його конструктивного рішення. Рациональною конструкцією гідростатичного опорного елемента є сферичний під'ятник 4, що має п'ять каналів з дроселями і відповідними карманами (рис. 2, б).

канавки 4, які з'єднують центральний карман із заглибинами поверхні 5 (рис. 4, в). В корпусі виконані відвідні канали 6, що служать до відводу частини робочого середовища із щілини, а також виконані сопла 7 системи струменевого регулювання (рис. 3, а).

Принцип роботи регульованого шарніра полягає у наступному. При підводі робочого середовища через дросель 2 в центральному кармані 3 встановлюється рівноважний тиск середовища. Стиснене середовище через дросельні канавки 4 проходить у заглибини 5, в яких встановлюється тиск менший, ніж в центральному каналі (рис. 3, б). Середовище із кармана 3 і заглибин 5 розповсюджується в щілині опорного елемента. Воно попадає у відвідні канали 6 і відводиться через дросель-регулятор 8. Кількість відведеного середовища регулюється для забезпечення необхідної несучої здатності опорного елемента.

В соплові пристрої 7 розташовані на периферійній ділянці щілини подається стиснене робоче середовище від зовнішньої магістралі через регульований дросель 9. Регулюванням опору дроселів 8 і 9 здійснюється зміна положення сфери та величина несучої здатності опорного елемента. При цьому струмені рідини взаємодіють із потоком, що розповсюджується в щілині і регулюють розподіл тиску в щілині змінюючи опорну реакцію та регулюючи положення сфери шарніра.

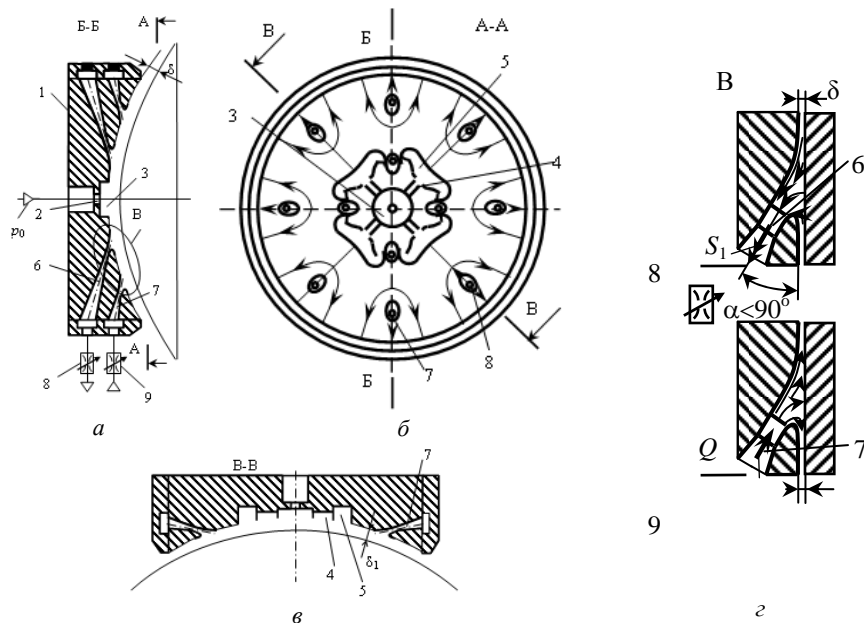


Рис. 3 – Інноваційне схемно-конструктивне рішення опорного елемента регульованого сферичного шарніра із сопловими пристроями виконаними безпосередньо в корпусі опорного елемента:  
 а – перетин опорного елемента із сопловими пристроями; б – розташування карманів і сопл на поверхні щілини; в – перетин опорного елемента із карманами і соплами; г – схема відводу робочого середовища від каналів та підводу до сопл

**Результати досліджень закономірностей течії робочого середовища в регульованих гідростатичних або аеростатичних шарнірах.** Запропоновані принципи струменевого регулювання гідростатичних та аеростатичних шарнірів і відповідна схемна і конструктивна реалізація даних принципів супроводжується виникненням специфічних струменевих течій робочого середовища в щілині. Для дослідження даних течій використані як традиційні методи чисельних розрахунків поля течії, так і спеціально розроблені аналітичні методи

розрахунків доповнені методами експериментальних досліджень.

Поля течії рідини в щілинах і карманах опор розраховані методом кінцевих елементів реалізованому в спеціалізованих пакетах для розрахунку течії рідини на основі чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса. Проведено розрахунки течії в дроселях і карманах опор та в об'ємі щілини. Визначені траєкторії руху частинок рідини на різних ділянках щілини (рис. 4).

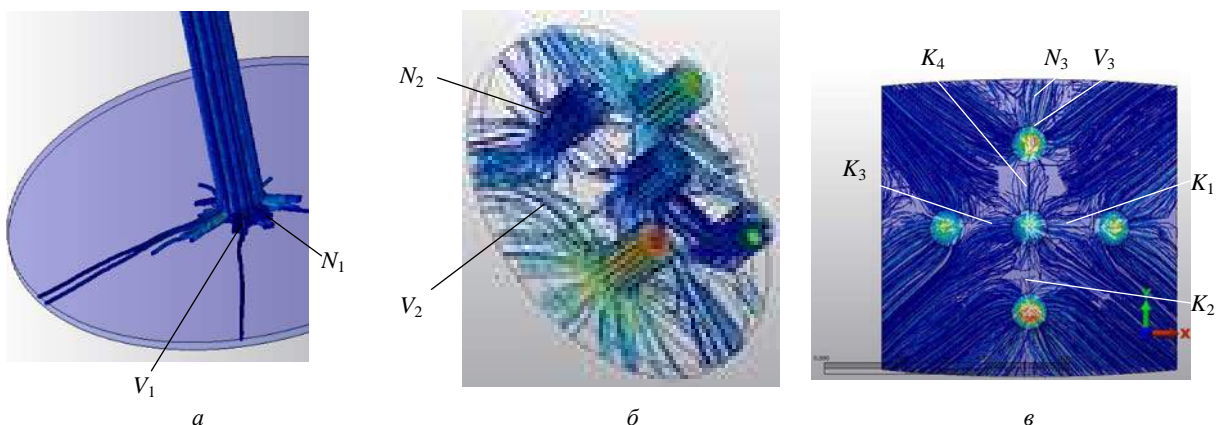


Рис. 4 – Розраховані на ЕОМ траєкторії руху частинок рідини в щілинах гідростатичних опорних елементів:  
 а – течія в дроселі та щілині пристрою з одним карманом; б – просторова течія в опорному елементі, що має 5 карманів;  
 в – лінії течії в перетині щілини даного опорного елемента

Із результатів розрахунків випливає, що в щілині опорного елемента встановлюється течія рідини близька до пошарової із складною взаємодією потоків. При цьому відривних областей значних розмірів у щілині не спостерігається. На межі карману є деяка нерівномірність течії (області  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ). Лінії течії в

перетині щілини є криволінійними (області  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ). Радіуси кривизни ліній течії залежать від взаємодії потоків і визначаються конфігурацією області між карманами опорного елемента. На ділянках щілини між карманами мають місце критичні області ( $K_1$ – $K_4$  на рис. 4, в), де лінії течії набувають сідлоподібної

форми. В даних областях має місце суттєве зниження швидкості частинок рідини [10].

Проведені розрахунки на ЕОМ просторового руху рідини в області взаємодії керуючого струменя із поверхнею сфери та подальшим попаданням струменя

в щілину (рис. 5, а). Чисельні методи не дають можливості детального визначення особливостей течії в критичних областях. Для цього розроблені спеціальні методи досліджень поля течії, які викладені нижче.

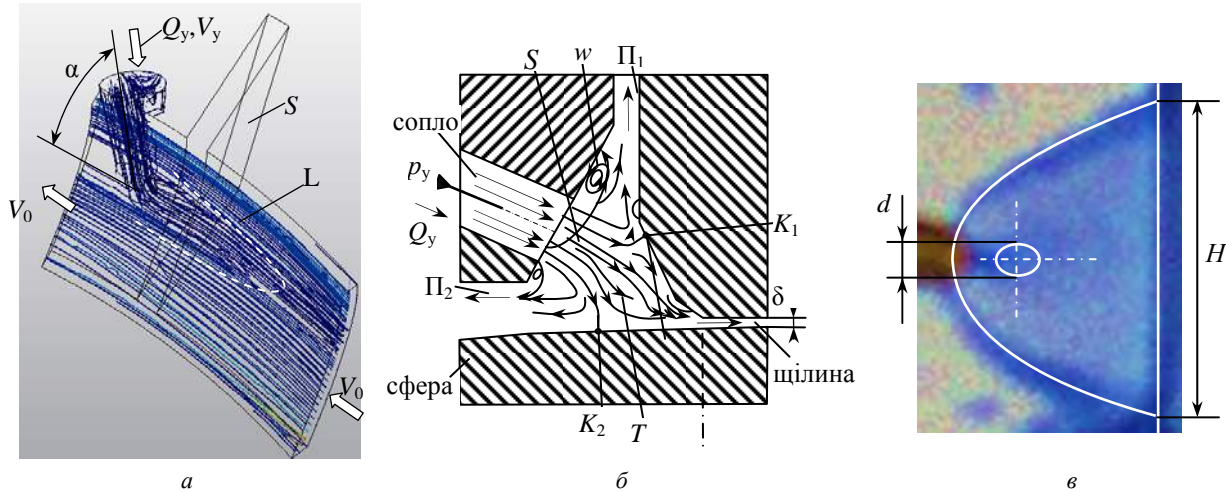


Рис. 5 – Результати досліджень просторового руху рідини при взаємодії струменя із поверхнею сфери та при попаданні струменя в щілину:

а – розрахунок на ЕОМ траєкторій руху частинок рідини; б – картина ліній течії в перетині осі струменя в площині перпендикулярній дотичній до сфери; в – експериментально визначена конфігурація керуючого струменя при його натиканні на тверду поверхню

Із результатів розрахунків випливає, що струмінь, який натікає на поверхню розширяється і проникає в щілину на відстань, яка складає 1–10 діаметрів струменя. Глибина проникнення струменя залежить від співвідношення швидкостей частинок рідини в струмені  $V_y$  та в щілині  $V_0$ , а відповідно і від тиску керування. Область проникнення рідини із струменя в щілину обмежена параболічним контуром  $L$ , ширина якого визначається співвідношенням швидкості потоку в щілині  $V_0$ , витратою рідини в струмені  $Q_y$  та кутом взаємодії струменя з поверхнею сфери  $\alpha$ .

По результатам розрахунків визначено закономірності течії в перетині осі струменя площиною перпендикулярною до поверхні сфери (рис. 5, б). Струмінь  $S$  формує на вході в щілину область підвищеного тиску  $T$ . По краях даної області виникають зворотні потоки  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$  з критичними областями  $K_1$  та  $K_2$ , в яких швидкості частинок рідини близькі до нуля. На виході із соплового пристрою виникають області вихроутворення  $w$ .

Для визначення ступеня розширення і конфігурації струменя при його взаємодії із поверхнею сфери проведені експериментальні дослідження (рис. 5, в). Встановлено, що струмінь який попадає на сферу, розширяється в поперечному напрямку в  $H/d = 8\text{--}12$  разів. При цьому його розмір по нормалі до поверхні сфери (перпендикулярно площині рисунка) становить 0,02–0,05 мм і є дещо більшим від розміру щілини. Ширина струменя по периметру щілини складає  $H = 4\text{--}6$  мм. Це забезпечує ефективне гідродинамічне запирання щілини натікаючим на неї струменем.

Для уточнення характеристик течії рідини в малорозмірних щілинах розроблено спеціальні засоби розрахунку закономірностей поля течії на основі методу ламінарної аналогії [11]. Згідно даного методу ламінарний (повільний) рух в'язкої рідини між двома близькими паралельними стінками по математичному опису є аналогічним плоскій потенціальній течії ідеальної рідини.

В щілині гідростатичної опори має місце повільний рух в'язкої рідини. При цьому диференціальні рівняння Нав'є-Стокса набувають вигляду [12]:

$$\text{grad}p = \mu \vec{\Delta} \vec{V}, \quad \text{div} \vec{V} = 0, \quad (1)$$

де  $p$  – тиск в певній точці щілини;  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\vec{V}$  – вектор швидкості.

Прийнято, що зміни тиску в перетині щілини у напрямку перпендикулярному стінкам є незначними, а проєкції швидкості частинок рідини в даному напрямку близькі до нуля. Тоді векторні рівняння (1) в проєкціях на вісі координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  будуть мати вигляд:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right),$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

де  $v_x$ ,  $v_y$  – проєкції швидкості в перетині щілини.

Розв'язок диференціальних рівнянь (2) знайдено у вигляді:

$$v_x = v_{x0}(x, y) \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right), \quad v_y = v_{y0}(x, y) \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right), \quad (3)$$

$$p = -\frac{2\mu}{h^2} \int_{x_0}^x G_0(x, y) dx = -\frac{2\mu}{h^2} \int_{y_0}^y G_0(x, y) dy \quad (4)$$

де  $v_{x0}(x, y)$ ,  $v_{y0}(x, y)$  – максимальні швидкості в перетині щілини в точці з координатами  $x$  і  $y$ ;  $h$  – половина розміру щілини;  $G_0(x, y)$  – функція, що визначає градієнт тиску в перетині щілини;  $x_0, y_0$  – координати деякої точки на периметрі щілини, де тиск вважається нульовим.

Підстановка залежностей (3, 4) в рівняння (2) приведе їх до вигляду:

$$v_{x0} \frac{\partial v_{x0}}{\partial x} + v_{y0} \frac{\partial v_{x0}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x},$$

$$v_{x0} \frac{\partial v_{y0}}{\partial x} + v_{y0} \frac{\partial v_{y0}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad \frac{\partial v_{x0}}{\partial x} + \frac{\partial v_{y0}}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Вид рівнянь (5) відповідає рівнянням руху ідеальної рідини [3, 12].

Відповідно функції  $v_{x0}(x, y)$ ,  $v_{y0}(x, y)$  та  $G_0(x, y)$  є розв'язком рівнянь плоского потенціального руху ідеальної рідини. Тому для визначення параметрів течії за допомогою рівнянь (3), (4) необхідно визначити проєкції швидкостей плоского руху ідеальної рідини в області, яка відповідає конфігурації щілини гідростатичного опорного елемента.

Запропоновано визначити параметри плоского потенціального руху рідини у вигляді суперпозиції простих потоків. Для експериментальної перевірки розробленого методу розглянута тестова задача у вигляді суперпозиції плоскопаралельного потоку і джерела. Це відповідає течії рідини в щілині із проникненням струменя на периферії гідростатичної опори. Функція течії ідеальної рідини в даному випадку визначається залежністю [3]:

$$\psi_1 = \frac{Q_1}{2\pi} \operatorname{artg}\left(\frac{y}{x}\right) - V_\infty y, \quad (6)$$

де  $Q_1$  – витрата рідини із точкового джерела, який відповідає керуючому струменю і знаходиться на початку системи координат;  $V_\infty$  – швидкість поступального руху при витіканні рідини із щілини опори.

Розрахована за формулою (6) картина ліній течії відповідає проникненню ізолюваного струменя в щілину опори (рис. 6, а).

Глибина проникнення керуючого струменя  $L$  та ширина втікаючого струменя  $H$  визначається співвідношенням витрати джерела  $Q_1$  і швидкості потоку у щілині  $V_\infty$  у формулі (6). Для перевірки методики розрахунків течії в щілині методом ламінарної аналогії проведені експериментальні дослідження на водяному столі з використанням макета регульованої гідростатичної опори [13]. Макет має вигляд прозорої пластини 1 встановленої з зазором на поверхні стола 2 (рис. 6, б).

Вода під тиском підводиться через отвір 3 в корпусі стола і формує витікаючий потік, який взаємодіє із пристінним струменем, що утворюється при натіканні круглого струменя 4, який формується в соплі 5. Рідина, що підводиться до сопла 5 підфарбована, тому на фото макета простежується чітка межа АКВ між втікаючим пристінним струменем і потоками води (6, 7), які витікають із щілини. Із порівняння розрахункової межі потоків (лінія АКВ на рис. 6, а) та експериментально визначеної (див. рис. 6, б) випливає їх кількісна і якісна відповідність. Це служить підтвердженням правильності запропонованої методики розрахунку струменевої течії в щілині запропонованим методом ламінарної аналогії.

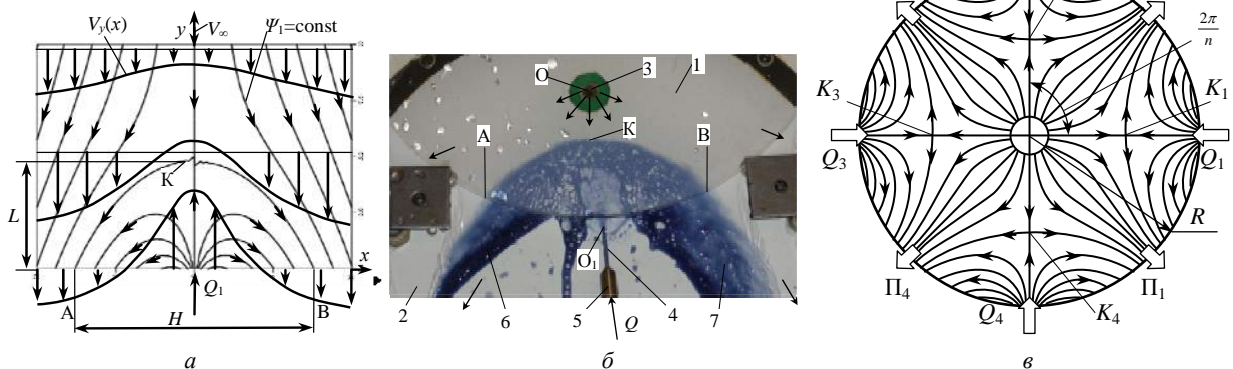


Рис. 6 – Картини ліній течії в щілинах регульованих гідростатичних опор при попаданні в них керуючих струменів: а – розрахунок по формулі (6); б – результати експериментальних вимірів; в – розрахунок по формулі (8) течії в щілині при наявності 4-х струменів

Метод розрахунку плоского руху ідеальної рідини розширено і узагальнено з метою дослідження течії в щілинах опорних елементів різного виду. Для опорних елементів, які мають центральний підвід робочого середовища і керуючі сопла розташовані на периферії щілини (див. рис. 1), розрахункова схема течії в щілині подана у вигляді суперпозиції кількох джерел. Центральне джерело відповідає дросельному

отвору, а останні  $n$ -джерел відповідають керуючим струменям розташованих на периферії опорного елемента. При цьому функція течії визначена формулою:

$$\psi_2 = \psi_0 + \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{2\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{y - y_k}{x - x_k}\right), \quad (7)$$

де  $\psi_0$  – функція течії відповідна течії з дросельного отвору;  $Q_k$  – витрата джерела відповідного керуючому  $k$ -му струменю;  $x_k, y_k$  – координати розташування  $k$ -го джерела.

Функція течії відповідна течії з дросельного отвору розташованого в центрі системи координат визначена у вигляді:

$$\psi_0 = \frac{Q_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, \quad (8)$$

де  $Q_0$  – витрата рідини через дросель.

Для опорного елемента в якому керуючі струмені розташовані рівномірно по колу в центрі якого розміщено дросель функція течії плоского потенціального руху рідини визначиться залежністю:

$$\psi = \psi_0 + \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{2\pi} \operatorname{arctg} \left\{ \frac{y - R \sin[2\pi(k-1)/n]}{x - R \cos[2\pi(k-1)/n]} \right\}, \quad (9)$$

де  $R$  – радіус опорного елемента на якому розташовані керуючі струмені.

Розрахункові за формулою (8) лінії течії рідини в щілині визначають закономірності руху рідини в регульованому опорному елементі. Для опорного елемента, що має 4 керуючі струмені, рідина на периферії щілини втікає чотирма потоками і витікає чотирма потоками (рис. 6, в). Співвідношення витрати

через дросель  $Q_0$  та витрат керуючих струменів  $Q_1-Q_4$  визначає інтенсивність витікаючих потоків  $\Pi_1-\Pi_4$ . В результаті аналізу картини ліній течії встановлено основну особливість гідродинамічних процесів у щілині регульованої гідростатичної опори, яка полягає у наступному. Попадання керуючих струменів у щілину приводить до виникнення складної течії з локалізованими вхідними потоками  $Q_1-Q_4$ . В щілині має місце ряд особливих (критичних) областей течії  $K_1-K_4$ , де середні швидкості частинок рідини становляться близькими до нуля, а тиск підвищується. Поряд з критичними областями формуються обмежені потоки рідини  $\Pi_1-\Pi_4$ , які витікають із щілини.

При розрахунках по формулам (6)–(8) прийнято, що сопла і дроселі мають нескінченно малі розміри. Дане припущення часто є неприйнятним для карманів і отворів сопл, які мають розміри порівнянні із розмірами щілини і виконані безпосередньо в корпусі опорного елемента (див. рис. 2, б та рис. 3). Тому розроблений метод узагальнено на випадок розрахунку течії в щілинах з карманами і отворами сопл кінцевих розмірів, які порівнянні з габаритними розмірами щілини опорного елемента. Зокрема проведено розрахунок параметрів течії в опорних елементах, які мають кармани кругової форми (рис. 7).

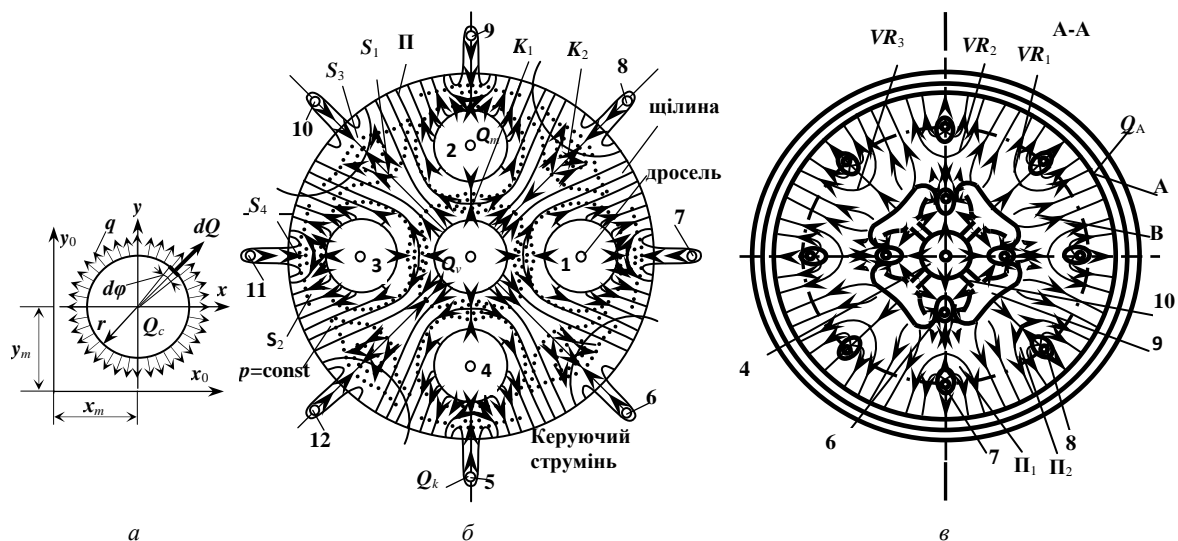


Рис. 7 – Геометричні схеми та результати розрахунків течії в щілинах регульованих опорних елементів із карманами і отворами сопл кінцевих розмірів:

*a* – розрахункова схема течії по периметру кругового кармана на якому розташовані неперервно розподілені джерела рідини;

*б* – результати розрахунку параметрів течії в щілині опорного елемента, який має 5 карманів (відповідно рис. 2, б);

*в* – результати розрахунку параметрів течії в щілині регульованого опорного елемента (відповідного рис. 3, б)

Прийнято, що по периметру кругового кармана (рис. 8, *a*) рівномірно розподілені витоки (джерела) рідини з інтенсивністю  $q$ . При цьому загальна витрата рідини з кармана радіуса  $r$  у щілину пов'язана із інтенсивністю джерел залежністю:

$$Q_c = 2\pi r q. \quad (10)$$

Функція течії в області поза карманом визначається формулою аналогічною (7) після граничного переходу від суми до інтеграла та підстановки в формулу координат кожного елементарного джерела з інтенсивністю  $dQ = q r d\varphi$

розташованого в точці  $x_k = r \cos \varphi$ ,  $y_k = r \sin \varphi$ . Для джерел розташованих на дузі кола, заданої кутівими координатами  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ , функція течії визначається криволінійним інтегралом:

$$\psi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} q r \cdot \operatorname{arctg} \frac{(y - r \sin \varphi)}{(x - r \cos \varphi)} \cdot d\varphi. \quad (11)$$

Функція течії, яка враховує джерела розташовані по всьому коловому периметру кармана визначається контурним інтегралом:

$$\psi_{oc} = \oint_c qr \cdot \arctg \frac{(y - r \sin \varphi)}{(x - r \cos \varphi)} \cdot d\varphi, \quad (12)$$

де  $c$  – визначає коловий контур для якого кут  $\varphi$  змінюється від 0 до  $2\pi$ .

Формула (12) узагальнюється на випадок  $s$  карманів колової форми розташованих на поверхні щілини опорного елемента. При цьому функція течії обчислюється за формулою:

$$\psi = \sum_{m=1}^s \int_0^{2\pi} q_m r \cdot \arctg \frac{(y - r_m \sin \varphi - y_m)}{(x - r_m \cos \varphi - x_m)}. \quad (13)$$

де  $x_m, y_m$  – координати розташування  $m$ -го кругового кармана радіусом  $r_m$ ;  $q_m = Q_m / (2\pi r_m)$  – інтенсивність джерел по периметру кармана із загальною витратою через його дросель  $Q_m$ .

Одержана формула (13) в поєднанні із залежністю (9) застосована для обчислення функції течії в щілині регульованого опорного елемента, що має центральний карман, чотири кармани розташовані навколо центрального на радіусі  $R_1$  та 8 керуючих сопл розташованих по периферії опорного елемента (рис. 7, б). Для даного випадку функція течії є сумою правих частин залежностей (12), (13) і (9) та має вигляд:

$$\begin{aligned} \psi_4 = & \int_0^{2\pi} \frac{Q_0}{2\pi r} \arctg \frac{(y - r \sin \varphi)}{(x - r \cos \varphi)} \cdot d\varphi + \\ & + \sum_{m=1}^4 \int_0^{2\pi} \frac{Q_m}{2\pi r} \arctg \frac{(y - r \sin \varphi - R_1 \sin[\pi(m-1)/2])}{(x - r \cos \varphi - R_1 \cos[\pi(m-1)/2])} \cdot d\varphi + \\ & + \sum_{k=1}^8 \frac{Q_k}{2\pi r} \arctg \frac{(y - R \sin[\pi(k-1)/4])}{(x - R \cos[\pi(k-1)/4])}, \quad (14) \end{aligned}$$

де  $Q_0$  – витрата рідини через дросель центрального кармана;  $Q_m$  – витрати рідини через дроселі кожного з чотирьох ( $m = 1, 2, \dots, 4$ ) карманів розташованих навколо центрального кармана на колі радіусом  $R$ ;  $Q_k$  – витрати рідин в керуючих струменях ( $k = 1, 2, \dots, 8$ ) розміщених на радіусі  $R$  по периферії опорного елемента.

Обчислення сум і інтегралів у формулі (14) здійснюється безпосередньо засобами математичних пакетів. Відповідно знаходиться символна модель, яка описує функцію течії в щілині. Лінії течії знаходяться відповідно умови  $\psi = \text{const}$  і формують картину течії.

В результаті розрахунків за формулою (14) одержана картина течії в щілині опорного елемента із струменевим регулюванням (рис. 7, б). Внаслідок витікання рідини із карманів із витратами  $Q_0, Q_m$  та  $Q_k$  у щілині опорного елемента формується складна течія рідини із критичними областями  $K_1$ , де швидкість частинок рідини близька до нуля. Струмені з витратами  $Q_k$  попадають в щілину і формують критичні області  $K_2$ . Між втікаючими струменями мають місце потоки П, де рідина витікає із щілини. Розглянута осесиметрична течія має місце лише при однакових витратах  $Q_m$  у всіх карманах та при однакових витратах  $Q_k$  у всіх струменях. Коли витрати відрізняються між собою, течія рідини в щілині стає несиметричною. При цьому критичні області

зберігаються, але змінюють своє розташування в щілині.

Одержані розрахункові залежності функції течії від координат є основою для визначення поля середніх швидкостей в щілині гідростатичної опори. Проекції швидкостей частинок рідини визначені шляхом диференціювання функції течії:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (15)$$

Диференціювання функції течії, відповідних формулам (7)–(14), здійснено у символному вигляді засобами математичних пакетів. При цьому одержані аналітичні вирази для розрахунку проекцій швидкостей. Наприклад, проекції швидкостей відповідні функції течії визначені формулою (6) складають:

$$v_{x0}(x, y) = \frac{Q_1}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} - V_\infty, \quad v_{y0}(x, y) = \frac{Q_1}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2}.$$

Для знаходження проекцій градієнта тиску використано формули (5). Підставивши значення швидкостей із формули (15) у залежності (5) одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} = & -\rho \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial p}{\partial y} = & -\rho \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial x} \right). \quad (16) \end{aligned}$$

За формулами (16) обчислено значення проекцій градієнта тиску по символній залежності функції течії від координат (14). Розрахунок поля статичного тиску в щілині шарніра здійснено шляхом обчислення криволінійного інтеграла:

$$p = \int_L \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + p_0,$$

де лінія  $L$ , по якій обчислюється інтеграл, має початок на периферії щілини в точці із значенням тиску  $p = p_0$ .

Результати обчислень ізobar поля течії в щілині показані на рис. 7, б пунктирними лініями. Встановлено, що в критичних областях мають місце області підвищеного тиску. В областях між карманами та у витікаючих потоках має місце мінімальний тиск рідини.

Для розрахунку поля течії в щілині в якій наявні кармани з криволінійними контурами (див. рис. 7, в) функція течії визначена шляхом опису контура кармана сумою ділянок у вигляді дуг кола. При цьому функція течії визначається сумою залежностей (11), які визначені для всіх дуг кола, що утворюють карман. Таким чином проведено розрахунок поля течії для опорного елемента із каналами і отворами складної форми (рис. 7, в). Еліптичні отвори при цьому апроксимовані овалами складеними із чотирьох дуг кола. Якщо рідина відводиться від отвору чи кармана витрата рідини в ньому вважається від'ємною. Результати розрахунків течії в щілині для складної системи карманів та сопл в цілому подібні розглянутим раніше. В щілині наявні критичні області швидкості в яких близькі до нуля. Витікаючі потоки мають незначну ширину. Це пов'язано з тим, що частина рідини із щілини витікає через отвори, які

розташовані між карманами в області підвищеного тиску.

На основі результатів проведених досліджень робочих процесів розроблено ряд дослідних зразків інноваційних гідростатичних та аеростатичних сферичних шарнірів із струменевим регулюванням положення сфери.

**Розроблені дослідні зразки інноваційних регульованих сферичних шарнірів та запропоновані технологічні методи виготовлення**

**їх основних деталей.** Запропоновані методи струменевого регулювання сферичних шарнірів є принципово новими. Тому для підтвердження їх ефективності розроблено, виготовлено і апробовано ряд дослідних зразків сферичних шарнірів.

Розроблені шарніри із гідростатичним центруванням положення сфери мають ряд регульованих опорних елементів розташованих діаметрально відносно сфери (рис. 8).

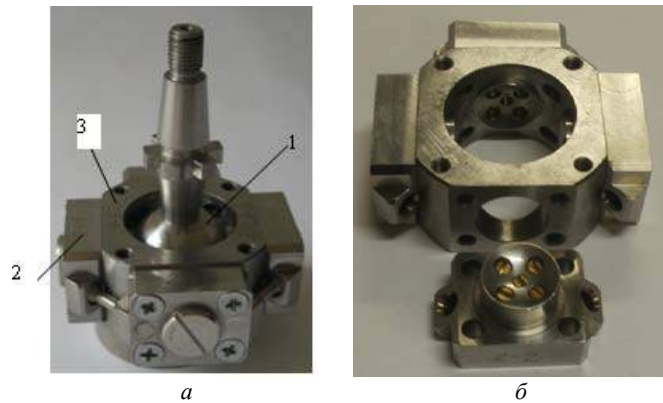


Рис. 8 – Дослідні зразки регульованих гідростатичних шарнірів із гідростатичним центруванням сфери: *а* – загальний вигляд шарніра, що має сферу із хвостовиком; *б* – фото окремого опорного елемента

Базовий варіант шарніра має сферу 1 із хвостовиком (рис. 8, *а*). Навколо сфери встановлені опорні елементи 2, які закріплені в корпусі 3. Кожний опорний елемент має п'ять карманів з дроселями (рис. 8, *б*). Гідравлічні комунікації виконані в корпусі шарніра.

Апробація розроблених шарнірів підтвердила їх працездатність і надійність роботи. Недоліком шарнірів із гідростатичним центруванням сфери є незначний діапазон поперечно-кутових переміщень, який знаходиться в межах конуса з кутом при вершині 45–50°.

Розроблені шарніри із вакуумним або магнітним центруванням положення сфери (див. рис. 2, *в*) мають діапазон поперечно-кутових переміщень в межах конуса з кутом при вершині 160–180–240° і вище. Розроблений дослідний зразок інноваційного шарніра із вакуумним центруванням сфери 1 має

чашкоподібний корпус 2, в якому виконано три регульовані аеростатичні опорні елементи 3 (рис. 9).

При виготовленні даного дослідного зразка шарніра використані прогресивні методи технології машинобудування. Зокрема, як фінішна операція обробки зовнішніх і внутрішніх сферичних поверхонь застосована обробка крайкою круга, вісь якого встановлена під кутом до осі обертання заготовки. Для компенсації деформацій корпуса внаслідок дії остаточних напружень передбачено регулювання максимального діаметрального розміру гвинтами 4 встановленими в тангенціальному напрямку (рис. 9, *б*).

Система струменевого регулювання включає ряд сопел 5 із комунікаціями 6, які виконані в спеціальному колекторі (рис. 9, *в*). Колектор виготовлено із фотополімера методом лазерної стереолітографії. Дослідна перевірка даного дослідного зразка підтвердила надійність його роботи та високі параметри стабільності положення сфери шарніра.

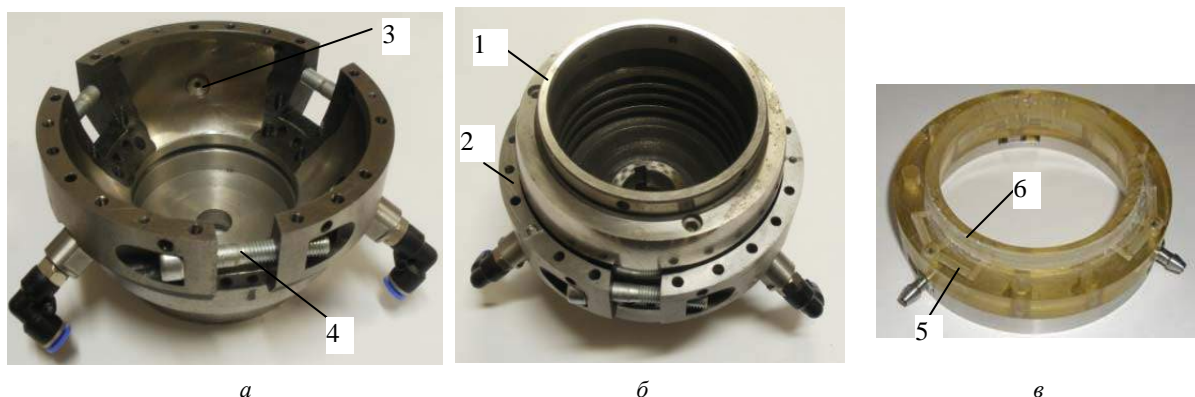


Рис. 9 – Дослідний зразок шарніра із вакуумним центруванням сфери та його основні деталі: *а* – зовнішній вигляд шарніра; *б* – розташування аеростатичних опорних елементів у сферичній порожнині корпуса; *в* – колектор в якому виконані сопла системи струменевого регулювання та комунікації



Розроблено дослідний зразок подвійного аеростатичного регульованого сферичного шарніра, який має корпус у вигляді постійного магніту та дві рухомі сфери із хвостовиками (рис. 10).

Аеростатичний шарнір має два опорні елементи із сферичними поверхнями виконаними із металполімерного композиту. На сферичних поверхнях виконані кармани у вигляді кільцевих

канавок з'єднаних із центральним карманом (рис. 10, б). Кармани і канавки мають мінімально можливі об'єми (рис. 10, в, з). Сопла системи керування виконані в колекторах, які розміщені на торцевих поверхнях магніта.

Подвійний шарнір реалізовано в якості дослідного зразка (рис. 10, д). Підтверджена працездатність і надійність роботи шарніра.

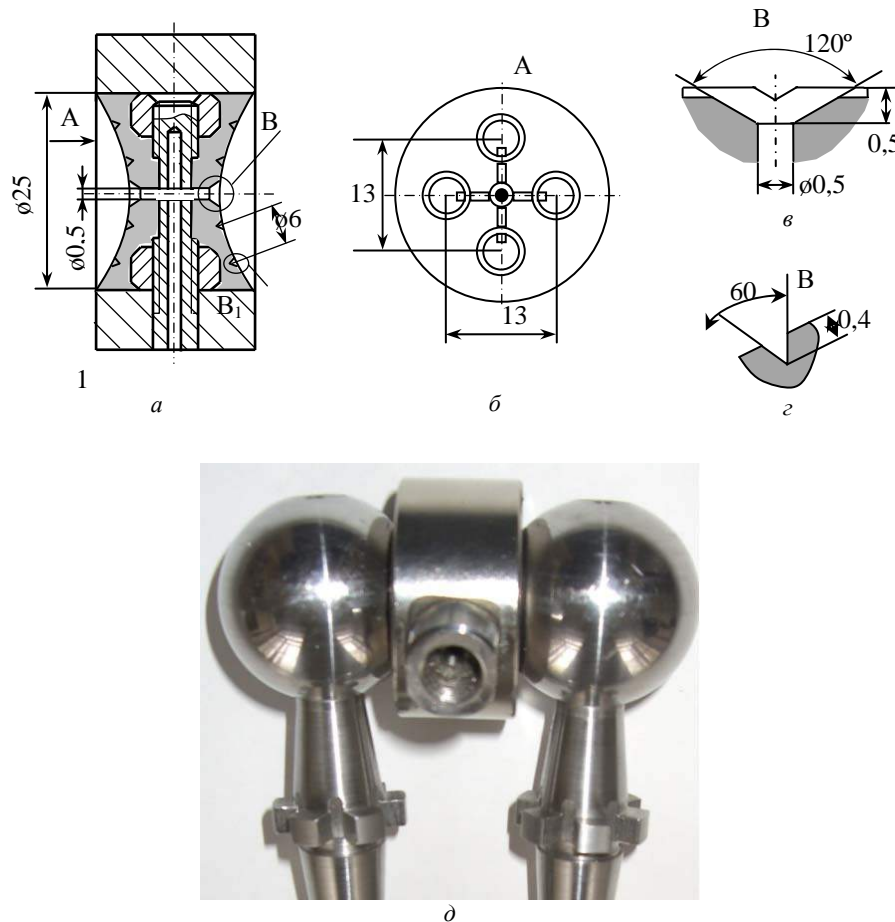


Рис. 10. Дослідний зразок подвійного сферичного шарніра із магнітним центруванням сфер та струменевим регулюванням: а – схема шарніра; б – розташування кільцевих карманів на поверхні опорного елемента; в – геометрія центрального кармана; з – форма перетину кільцевої канавки; д – дослідний зразок шарніра із двома сферами

**Висновки.** 1. Запропоновані принципи і схемна реалізація струменевого регулювання положення сфери дає можливість створити інноваційні регульовані гідростатичні та аеростатичні шарніри із розширеними функціональними можливостями, які полягають у регулюванні положення сфери в межах зазору між сферичними поверхнями. При цьому положення сфери регулюється в трьох напрямках в діапазоні 0,05–0,1 мм по кожному напрямку. Вперше запропоновані схемні і конструктивні рішення дають можливість реалізувати сферичні шарніри із гідростатичним чи аеростатичним, вакуумним або магнітним центруванням положення сфери в номінальному положенні при відсутності сигналу керування.

2. На основі чисельного моделювання, аналітичних розрахунків та експериментальних вимірів параметрів поля течії в проточній частині шарнірів із струменевим регулюванням встановлено

наявність складних струменевих течій в щілині опорного елемента та в області розповсюдження керуючих струменів та їх взаємодії із твердими поверхнями. Особливістю течії є наявність критичних областей в щілині, взаємодія прямих і зворотніх потоків. Підтверджена ефективність застосування метода ламінарної аналогії для визначення параметрів течії в щілинах з карманами і отворами різноманітної форми і розташування.

3. Розробка і апробація дослідних зразків ряду варіантів сферичних шарнірів підтвердила їх працездатність і надійність роботи. Встановлено, що використання комп'ютерно-інтегрованих методів технології машинобудування та нових матеріалів (кераміка, металполімерні композити дає можливість створити інноваційні конструкції регульованих сферичних шарнірів із необхідними діапазонами поперечно-кутових переміщень та заданими параметрами регулювання положення сфери.

**Список літератури:** 1. Бушуев В. В. Практика конструирования машин : справочник / В. В. Бушуев. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с. 2. Rybak L. Computer-Aided Modeling of Dynamics of Manipulator-Tripod with Six Degree of Freedom / L. Rybak, E. Gaponenko, A. Chichvarin [et al.] // *Word Applied Sciences Journal*. – 2013. – № 25 (2). – P. 341–346. 3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1973. – 847 с. 4. Воскресенский В. А. Расчет и проектирование опор жидкостного трения / В. А. Воскресенский, В. И. Дьяков, А. З. Зиле. – М. : Машиностроение, 1983. – 232 с. 5. Шиманович М. А. Бесконтактные опоры с внешним источником давления смазочной среды / А. А. Шиманович // Станки и инструмент. – 1987. – № 6. – С. 16–18. 6. Heisel U. Development of controllable spherical fluid friction hinges for exact spatial mechanisms / U. Heisel, S. Strutinskiy, V. Sidorko [et al.] // *Production Engineering*. – 2011 – Vol. 5. – P. 241–250. 7. Strutinsky S. Frecarea hidrodinamică a articulați ilorsferice, realizate din composite metal-polimer, cu suprafețele de lucru (engl. rez. rom) / S. Strutinsky // *Buletinul Institutul ui politehnic din Iași, publicat de Universitate a Tecnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Tomul LX (LXIV)*, Fasc. 3–4, 2014. – P. 99–111. 8. Яхно О. М. Гидростатично-аеростатичний опорний вузол : №u200714415 : UA, МПК (2006) F16C32/06 / О. М. Яхно, С. В. Струтинський // Патент України на корисну модель № 31194; заявл. 20.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6. 9. Яхно О. М. Регульований гідроаеростатичний підшипник : №u201113269 : UA, МПК (2006) F16C32/06 / О. М. Яхно, С. В. Струтинський // Патент України на корисну модель № 71154; заявл. 10.11.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13. – 3 с. 10. Strytinsky S. Rational Algorithms of Management Mechatronic Systems of Hydrostatic Spherical Support of Mechanisms Hexapod / S. Strytinsky, Yu. Filatov // *Proceeding softhe 15<sup>th</sup> International Conference "Mechanika'2010"*. – Lithuania, Kaunas University of Technology, 8–9 April 2010. – P. 162–165. 11. Повх И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – Л. : Машиностроение, 1976. – 504 с. 12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. – 712 с. 13. Jachno O. Technological provision of controlling the spherical aerostatics upporting knots of spatial mechanism in the quality mechatronic systems / O. Jachno, S. Strytinsky // *Hydraulika i*

*Pneumatyka*. – Wroclaw, Stowarzy-szenia Inzynierow i Technikow Mechanikow Polskich. – 2009. – № 6. – P. 19–23.

**References:** 1. Bushuev, V. V. *Praktika konstruirovaniya mashin: spravochnik*. Moscow: Mashinostroenie, 2006. Print. 2. Rybak, L., et al. "Computer-Aided Modeling of Dynamics of Manipulator-Tripod with Six Degree of Freedom." *Word Applied Sciences Journal* 25.2 (2013): 341–346. Print. 3. Lojcsjanskij, L. G. *Mehanika zhidkosti i gaza*. Moscow: Nauka, 1973. Print. 4. Voskresenskij, V. A., V. I. D'jakov and A. Z. Zile. *Raschet i proektirovanie opor zhidkostnogo trenija*. Moscow: Mashinostroenie, 1983. Print. 5. Shimanovich, M. A. "Beskontaktnye opory s vneshnim istochnikom davlenija smazочноj sredy." *Stanki i instrument*. No. 6. 1987. 16–18. Print. 6. Heisel, U., et al. "Development of controllable spherical fluid friction hinges for exact spatial mechanisms" *Production Engineering*. V. 5. 2011. 241–250. Print. 7. Strutinsky, S. "Frecarea hidrodinamică a articulați ilorsferice, realizate din composite metal-polimer, cu suprafețele de lucru." *Buletinul Institutul ui politehnic din Iași, publicat de Universitate a Tecnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Tomul LX (LXIV)*. Fasc. 3–4. 2014. 99–111. Print. 8. Jahno, O. M., and S. V. Strutinsk'ij. *Gidrostatichno-aerostatichnij opornij vuzol*. UA Patent, No.u200714415 (MPK F16C32/06). 25 March 2008. Print. 9. Jahno, O. M., and S. V. Strutinsk'ij. *Regul'ovaniy gidro aerostatichnij pidshipnik*. UA Patent, No.u201113269 (MPK F16C32/06). 10 July 2012. Print. 10. Strytinsky, S., and Yu. Filatov. "Rational Algorithms of Management Mechatronic Systems of Hydrostatic Spherical Support of Mechanisms Hexapod." *Proceeding softhe 15<sup>th</sup> International Conference "Mechanika'2010"*. Lithuania, Kaunas University of Technology, 8–9 April 2010. 162–165. Print. 11. Povh, I. L. *Tehnicheskaja gidromehaniika*. Leningrad: Mashinostroenie, 1976. Print. 12. Shlihting, G. *Teorija pogranichnogo sloja*. Moscow: Nauka, 1974. Print. 13. Jachno, O., and S. Strutinskiy. "Technological provision of controlling the spherical aerostatics upporting knots of spatial mechanism in the quality mechatronic systems." *Hydraulika i Pneumatyka*. No.6. Wroclaw: Stowarzy-szenia Inzynierow i Technikow Mechanikow Polskich. 2009. 19–23. Print.

Надійшла (received) 25.12.2015

**Струтинський Сергій Васильович** – кандидат технічних наук; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки», м. Київ; тел.: (099) 486-11-03; e-mail: strutynskiy@gmail.com.

**Strutinsky Sergey V.** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of "Applied fluid mechanics and mehanotroniky", Kyiv; tel.: (099) 486-11-03; e-mail: strutynskiy@gmail.com.